УДК 622.02:531+622.83

Ю.А.КАШНИКОВ, *д-р техн. наук, профессор, geotech@pstu.ac.ru*
С.Г.АШИХМИН, *д-р техн. наук, доцент*
В.Г.БУКИН, *ассистент*
С.В.ГРИШКО, *старший преподаватель*
Пермский государственный технический университет, geotech@pstu.ac.ru
И.В.ГЕТМАНОВ, *главный маркшейдер*
С.Л.ОДИНЦОВ, *зам. главного маркшейдера, adm@astrakhan-dobycha.gazprom.ru*
ООО «Газпром добыча Астрахань»
А.В.ГОРБАТИКОВ, *канд. техн. наук, вед. науч. сотр., direction@ifz.ru*
ИФЗ РАН, Москва

Yu.A.KASHNIKOV *Dr. in eng. sc., professor, geotech@pstu.ac.ru*
S.G.ASHIKHMIN, *Dr. in eng. sc., associate professor*
V.G.BUKIN, *assistant*
S.V.GRISHKO, *senior lecturer*
The Permian State Technical University, geotech@pstu.ac.ru
I.V.GETMANOV, *chief mine surveyor*
S.L.ODINTSOV, *deputy chief mine surveyor, adm@astrakhan-dobycha.gazprom.ru*
Gasprom output, Astrakhan Co.
A.V.GORBATIKOV, *PhD in eng. sc., leading research assistant, direction@ifz.ru*
EFI RAS, Moscow

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ТЕХНОГЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

На Астраханском газоконденсатном месторождении (АГКМ) с 2005 по 2008 г. зафиксировано три техногенных землетрясения. Результаты геодезических наблюдений позволяют утверждать, что сейсмическому событию предшествуют поднятия поверхности и последующие интенсивные оседания, вызванные разгрузкой массива. Данное явление можно рассматривать как деформационный предвестник и использовать для прогноза техногенных сейсмических явлений на месторождениях нефти и газа.

***Ключевые слова*:** техногенная сейсмичность при добыче газа, предвестники техногенных землетрясений, динамика земной поверхности, прогноз опасности.

DEFORMATIONAL PRECURSORS OF TECHNOGENIC EARTHQUAKES IN MINING THE HYDROCARBON DEPOSITS

During monitoring since 2005 to 2008 at the Astrakhan gas-field it has been recorded three technogenic earthquakes. Results of geodetic levelling for the given period allow to approve that seismic event is preceded by raisings of a surface and its subsequent subsidence as a its result of unloading. That allows to use geodetic levelling for the forecast of technogenic seismic phenomena for oil and gas fields.

***Key words*:** technogenic seismicity in gas output, precursors of technogenic earthtquakes, dynamics of the earth surface, prediction of hazard.

В течение 2000-2004 гг. на территории крупнейшего в мире Астраханского газоконденсатного месторождения создан комплексный геодинамический полигон, включающий сеть нивелирования и спутниковых наблюдений за деформациями земной по-

верхности, сеть сейсмоприемников, гравиметрических и атмосферных геохимических наблюдений. Анализ результатов наблюдений показывает, что созданный полигон позволяет надежно контролировать геомеханические и геодинамические процессы при разработке месторождения. С 2005 по 2008 г. было зафиксировано три техногенных землетрясения с магнитудой до 3. Результаты геодезических наблюдений за данный период времени позволяют утверждать, что техногенному сейсмическому событию предшествуют поднятия поверхности и последующие интенсивные оседания, вызванные сбросом напряжений и разгрузкой массива. В этой связи поднятия поверхности можно рассматривать как деформационный предвестник и использовать геодезические наблюдения для прогноза техногенных сейсмических явлений на месторождениях нефти и газа.

В 2000 г. специалистами Пермского государственного технического университета была выполнена работа, направленная на предварительный анализ геомеханических и геодинамических процессов, сопровождающих разработку АГКМ. В частности, анализировался вопрос оценки магнитуд возможных техногенных сейсмических событий. В результате расчетов получили значение магнитуды M = 2,0-2,5 на данный период. Сброс касательных напряжений в процессе развития магистральной трещины сдвига в субвертикальном тектоническом нарушении оценивался от 0,0 до 7 МПа, составляя в среднем 2-3 МПа. Величины дислокаций, т.е. вертикальных смещений горного массива, при этом не превышают 15 мм. Было отмечено, что смещения подобной величины не приводят к нарушению целостности скважин. Отмечалось также, что если рассматривать месторождение Лак (Франция) как геомеханический и геодинамический аналог АГКМ, то начало событий с M = 2-2,5 можно ожидать через 5-7 лет, т.е. в 2000-2007 гг.

Последующее развитие геодинамических процессов на АГКМ подтвердили данные расчеты. Первое значимое событие с магнитудой 1,8-1,9 произошло 05.09.2005, 16.10.2007 произошло событие с магнитудой 3,6, а 29.09.2008 с магнитудой 3,0.

Сейсмологическая система АГКМ состоит из семи наблюдательных пунктов, оборудованных идентичными сейсмическими станциями типа «Дельта-Геон». Сейсмологическая наблюдательная система была введена в действие в сентябре 2003 г. и проработала до октября 2008 г. с перерывом на зимний период январь-февраль 2004 г. и январь-февраль 2005 г. Из-за малого количества снега перерыва на зимний период 2006-2007 гг. не было. Вынужденные перерывы в работе объяснялись недоступностью пунктов в зимнее время. В остальное время года все наблюдательные пункты системы периодически обслуживались 7-12 сут. В феврале-марте 2008 г. работа системы была приостановлена, так как проводились непредвиденные работы по ремонту оборудования. Из 12 месяцев каждого года прямые потери времени регистрации за счет зимних месяцев составляют 17-20 %. Это соответственно приводит к потере 17-20 % сейсмических событий, среди которых могут находиться опасные для АГКМ локальные землетрясения.

К настоящему времени сейсмологическая система представляет собой стабильно работающий инструмент наблюдения за сейсмическими событиями телесейсмического и регионального характера, а также событиями локального происхождения, регистрируемыми на территории АГКМ.

Для автоматизации обработки зарегистрированных событий наблюдательная система обеспечена программным комплексом, который до 2006 года включал в себя:

- программу перевода форматов DDB → ADB;
- программу визуализации ADB-файлов;
- программу создания SEV-файлов (SEV-seismic event, или сейсмическое событие);
- программу DETRACE.

Дополнительно к комплексу использовалась программа HYPOELLIPSE.

Начиная с 2006 г. для визуализации монтажей сейсмических записей и расчета гипоцентров стала применяться программа WSG, которая была разработана и используется для обработки сейсмических записей в Федеральной геофизической службе РАН.

Для идентификации событий при обработке данных системы АГКМ предусмотрено сопоставление времени зарегистрированных сейсмических событий с мировым сейсмологическим каталогом, публикуемым Федеральной геофизической службой РАН в Интернете. После сопоставления времени вступления сейсмического события, зарегистрированного системой АГКМ, с данными каталога, делается заключение, является ли анализируемая запись далеким или региональным землетрясением, либо это локальное сейсмическое событие.

Процедура регистрации и обработки записей сейсмических событий на АГКМ установлена в 2003 г. при организации сети и продолжает соблюдаться до настоящего времени. В 2006 г. комплекс был дополнительно оснащен программой WSG, на базе которой построена система обработки Федеральной геофизической службы РАН. При этом сохранены этапы и основные процедуры ведения службы наблюдений за сейсмическими событиями на территории АГКМ. Отметим, однако, что перерывы в работе сейсмологической сети и ее техническое несовершенство уже не позволяют в настоящее время регистрировать весь спектр событий.

Начальная серия маркшейдерско-геодезических наблюдений за оседаниями земной поверхности при разработке АГКМ была выполнена в 2003 г. Первые повторные наблюдения 2004 г. показали наличие оседаний, практически равномерно распределенных по всей области падения пластового давления, с максимальным значением за год наблюдений (май 2003 г. – сентябрь 2004 г.) 12-13 мм. За данный период не отмечено техногенных сейсмических явлений.

Нивелирование реперов, выполненное в октябре 2005 г., показало вместо ожидаемого опускания реперов поднятия двух участков земной поверхности относительно 2004 г. Величины поднятий сравнительно невелики – 2-5 мм, однако они устойчиво захватывают большие территории площадью 55-60 км^2 (рис.1). Поднятия поверхности труднообъяснимы, так как именно в этих районах наблюдается наиболее значительное годовое падение пластового давления (1,5-2,5 МПа). Имеются все основания утверждать, что поднятия поверхности в 2005 г. и сейсмическое событие на территории АГКМ, зарегистрированное в сентябре 2005 г., глубоко взаимосвязаны. Максимум поднятия земной поверхности с октября 2004 г. по сентябрь 2005 г. приходится на район сейсмического события. С сентября 2005 г. по октябрь 2006 г. происходит интенсивное развитие оседаний в области предыдущего поднятия, причем максимум оседаний 18-20 мм приходится снова на район события (рис.2). Это подтверждается и результатами спутниковых наблюдений за апрель 2005 – апрель 2006 гг., которые зафиксировали годовое поднятие района сейсмического события 10 мм. Кроме того, векторы плановых смещений практически всех пунктов направлены к центру объекта разработки.

В 2006 г. произошло максимальное опускание поверхности, вызванное разгрузкой горного массива от сброшенных напряжений в результате сейсмического события сентября 2005 г. Соответствующие опускания поверхности зафиксированы в 2007-2008 гг., однако годовая интенсивность опусканий значительно ниже 2005 г.

Таким образом, отсутствие техногенных сейсмических событий в центральной разрабатываемой части месторождения в 2006-2008 гг. вполне объяснимо: произошла разгрузка пород от напряжений в виде сейсмического события, и начался процесс интенсивных оседаний. В 2006-2008 гг. не следовало ожидать сейсмических событий в центральных частях месторождения, так как шел процесс разгрузки массива и накопления упругой энергии.

Однако процесс разгрузки центральной части массива месторождения в 2006-2008 гг. привел к соответствующему накоплению упругой энергии в краевых частях. Как следствие этого произошли два сейсмических события в северной (16.10.2007 г., M = 3,6) и северо-западной (29.09.2008 г., M = 3,0) частях месторождения.

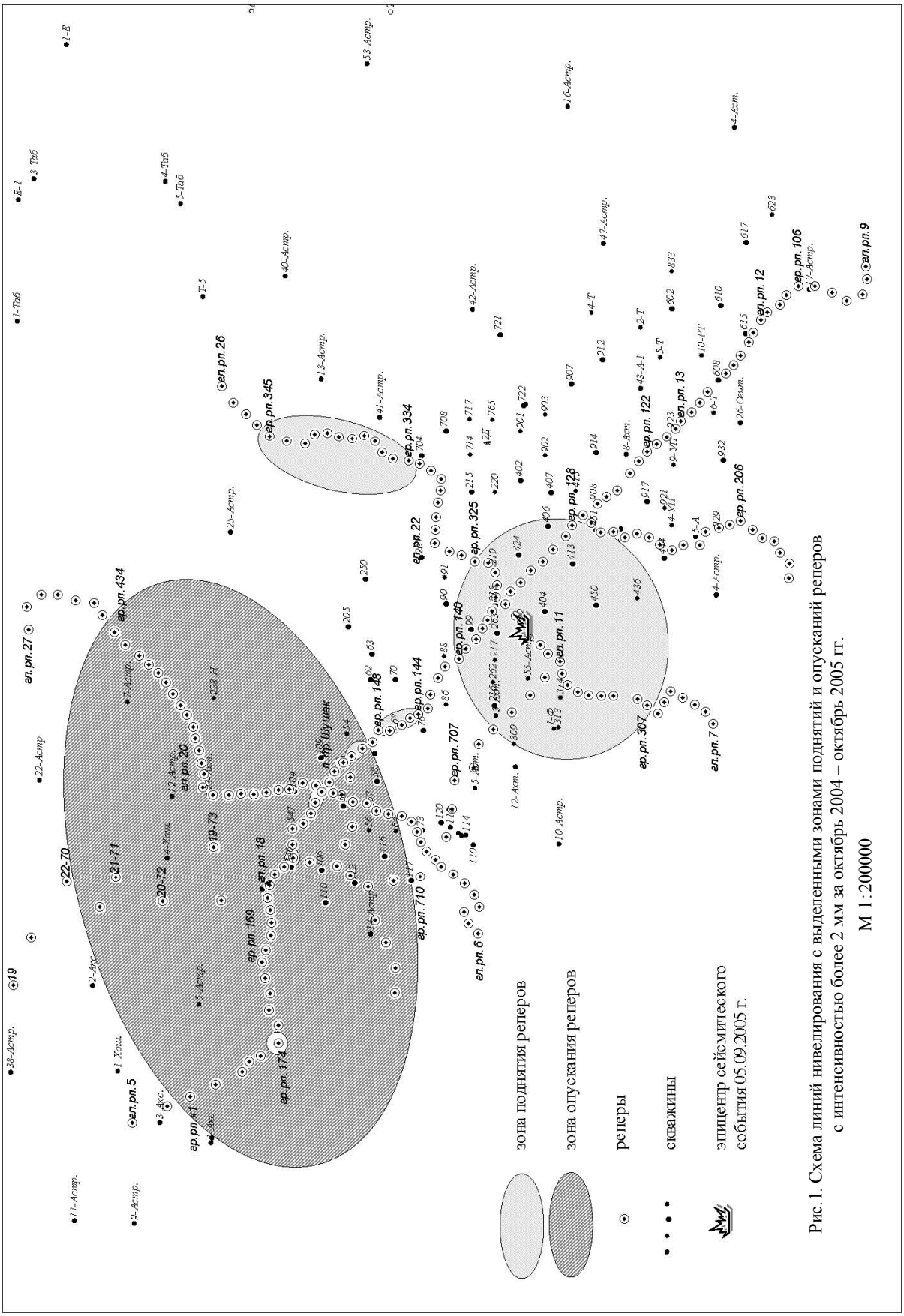


Рис. 1. Схема линий нивелирования с выделенными зонами поднятий и опусканий реперов с интенсивностью более 2 мм за октябрь 2004 – октябрь 2005 гг.

М 1:200000

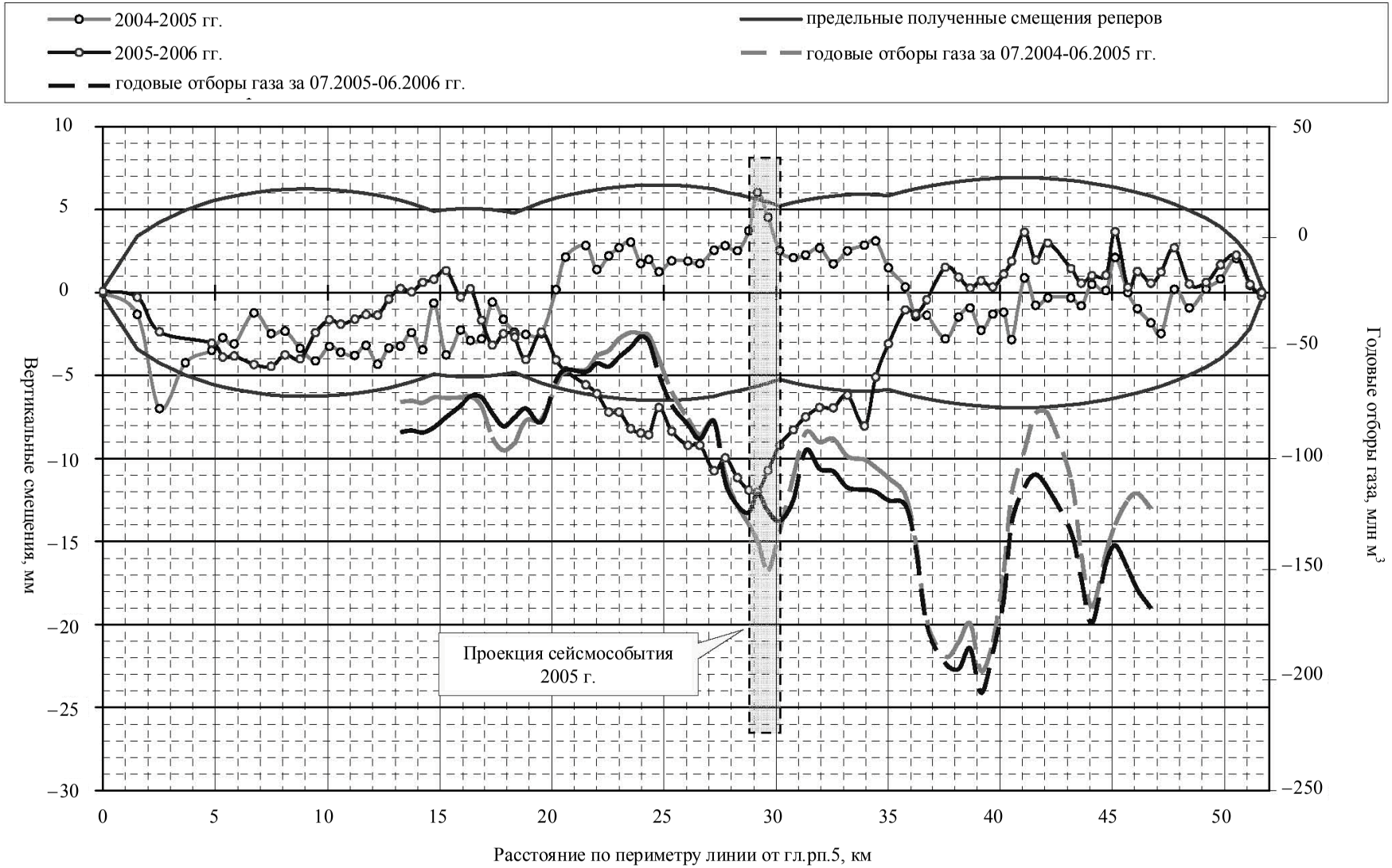


Рис.2. Совмещенные графики вертикальных смещений реперов и годовых отборов газа по профильной линии гл.рп.5-9 наблюдательной станции АГКМ

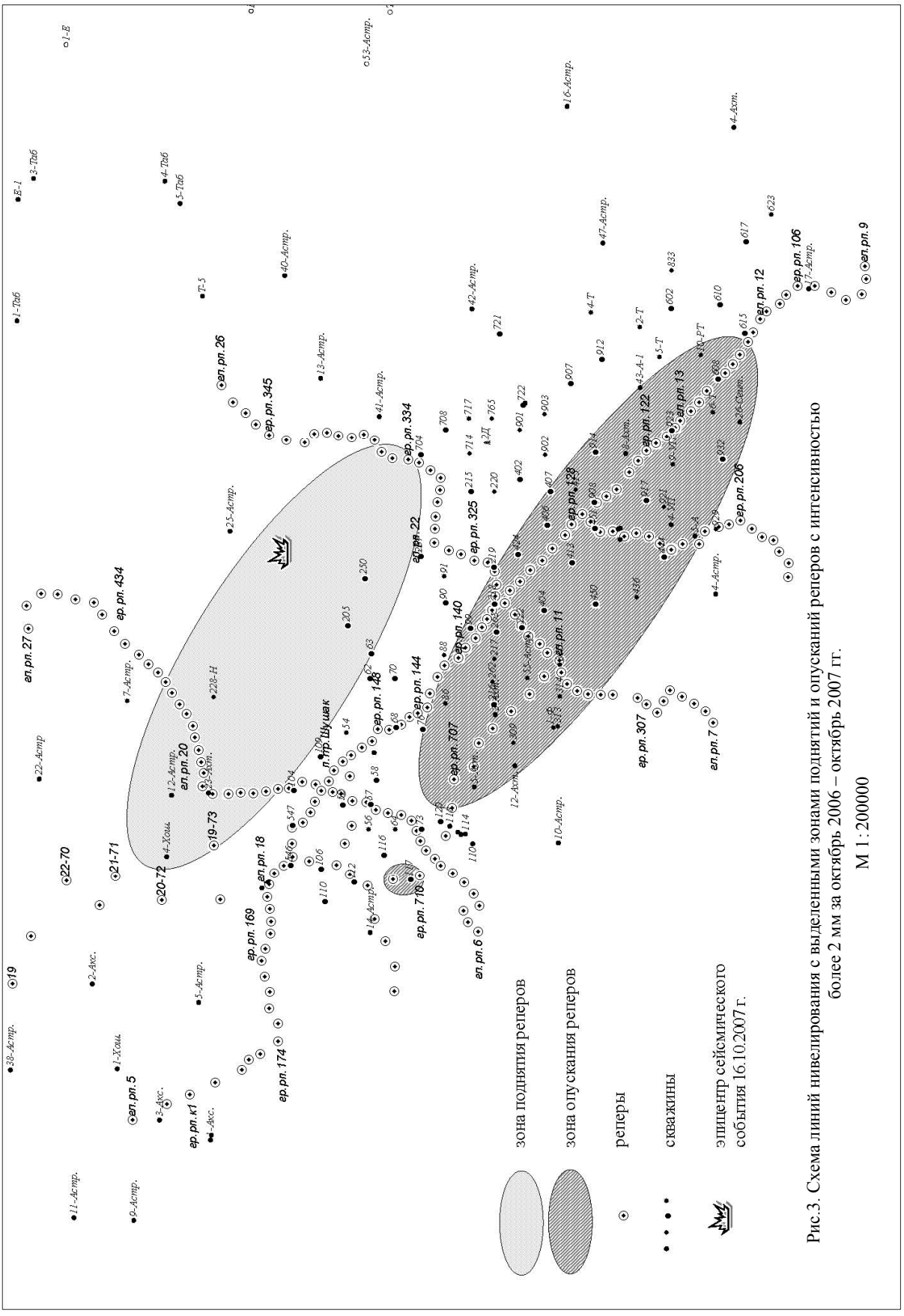


Рис.3. Схема линий нивелирования с выделенными зонами поднятий и опусканий реперов с интенсивностью более 2 мм за октябрь 2006 – октябрь 2007 гг.

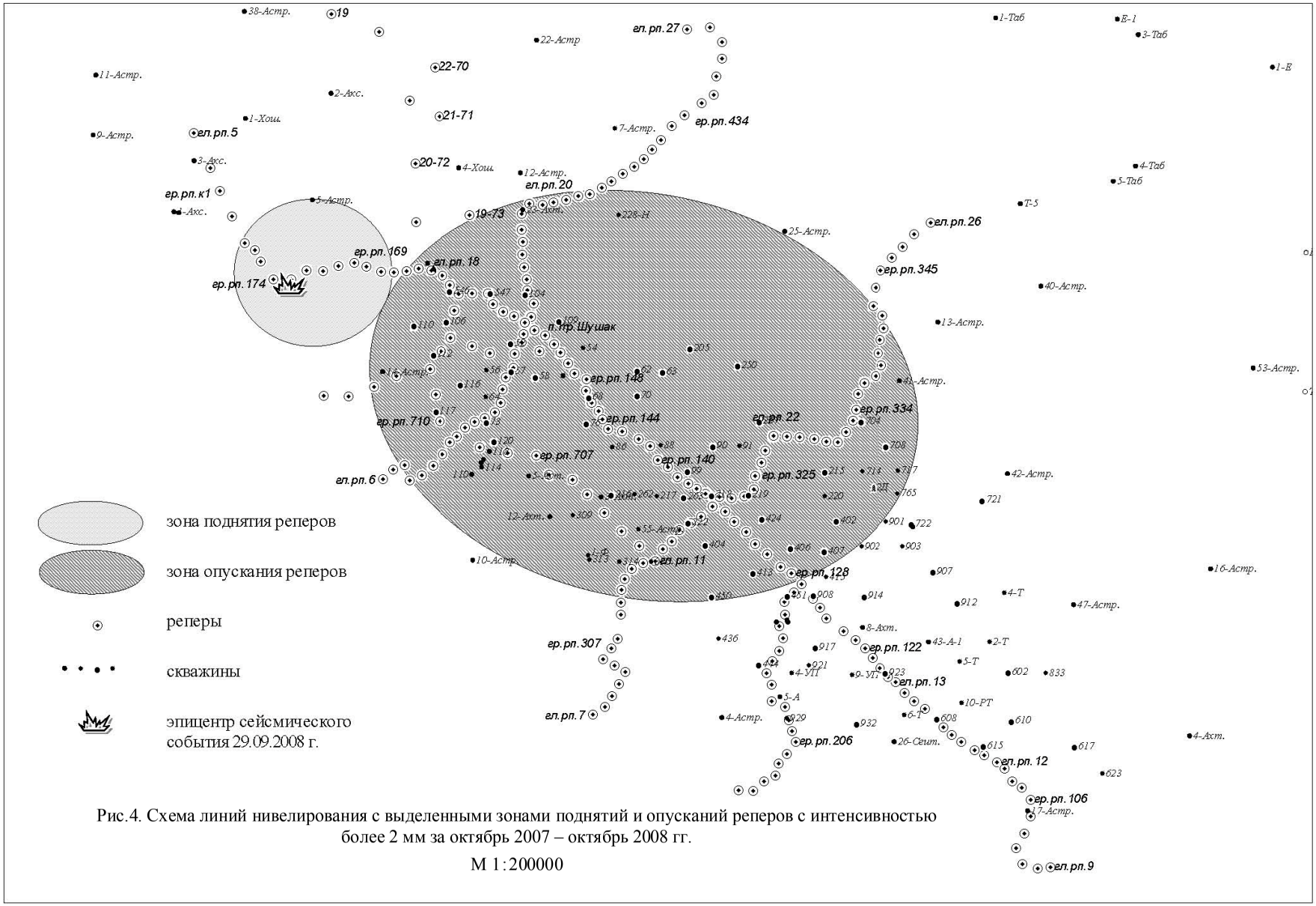


Рис.4. Схема линий нивелирования с выделенными зонами поднятий и опусканий реперов с интенсивностью более 2 мм за октябрь 2007 – октябрь 2008 гг.

М 1:200000

Эпицентр события 16.10.2007 г. весьма трудно определяется из-за сложности произошедшего события. Однако тщательный анализ показал, что наиболее вероятное место возникновения события – район шестой сейсмологической станции. В данном месте нет пунктов нивелирования. Однако по ближайшим профильным линиям гл.рп.27-6 и 26-7, удаленным соответственно на 5,5 и 7 км от предполагаемого эпицентра, четко выделяются годовые поднятия реперов с октября 2006 по октябрь 2007 гг. Причем зона поднятия по линии гл.рп.27-6 исключительно выражена. По линии и гл.рп.26-7 она выделяется меньшим интервалом и интенсивностью (что связано, по всей вероятности, с удаленностью реперов от места события), однако также просматривается достаточно четко. Как следует из рис.3, поднятия земной поверхности за данный период присутствуют только в данном месте, причем площадь поднятия превышает в 2-2,5 раза площади поднятий в 2005 и 2008 гг. По всей вероятности, это связано с бóльшей магнитудой произошедшего события.

Факт поднятия поверхности в данном месте подтверждается и спутниковыми наблюдениями за апрель 2007 – апрель 2008 гг. Следует, однако, отметить, что по данным нивелирования октября 2008 г. в данном месте не наблюдалось интенсивных оседаний поверхности. Это обстоятельство можно объяснить отсутствием в данном районе добычи газа.

Сейсмическое событие с M = 3,0 в северо-западной части месторождения произошло 29.09.2008 г. На рис.4 показаны зоны опусканий и поднятий реперов за октябрь 2007 – октябрь 2008 гг. Также видно, что эпицентр события приходится на зону поднятия. Поднятия земной поверхности, предшествующие данному сейсмическому событию, зафиксированы также спутниковыми наблюдениями в период с 04.2007 по 04.2008 г. Характерно, что с 04.2006 по 04.2007 г. на данной территории наблюдались опускания поверхности.

Геодезический аспект техногенных землетрясений (тем более при добыче углеводородного сырья) практически не изучен, возможно, из-за незначительного числа. Существуют данные по газовому месторождению Газли*. Земная поверхность в центральной части месторождения до 1974 г. опускалась со скоростью 10 мм/год (1964-1968 гг.) и 19 мм/год (1968-1974 гг.). Они были предвестниками первого землетрясения в 1976 г. (8 апреля и 17 мая). После него в 1976-1977 гг. зафиксирована просадка до 230 мм. 5 июля 1978 г. произошло еще одно землетрясение. До этого (сентябрь 1977 г.) отмечено поднятие земной поверхности на 25-48 мм, после землетрясения – опускание до 245 мм (октябрь 1978 г.). В 1978 г. опускание достигло 313 мм. Средняя скорость опускания в 1979-1982 гг. достигла 25 мм/год. 20 марта 1984 г. произошло новое землетрясение, после которого зафиксировано поднятие земной поверхности в центральной части месторождения на 143 мм.

Таким образом, достаточно убедительные основания свидетельствуют о том, что техногенному сейсмическому событию предшествуют поднятия поверхности и последующие интенсивные оседания, вызванные сбросом напряжений и разгрузкой массива. При этом поднятия поверхности можно рассматривать как деформационный предвестник землетрясения, т.е. геодезические наблюдения могут служить, в определенной степени, основой для прогноза места, а при накоплении надежных статистических данных – и времени возникновения события.

---

* *Grasso J.R.*, *Plotnikova L.M.*, *Nutaev L.M. Bossu R.* The Three M-7 Gazli Earthquakes, Usbekistan, Central Asia: The Largest Seismic Energy Releases by Human Activity, XXI Gen Ass. Int. Union Geodesy & Geophys. A363, 1995.

Simpson D., *Leith W.* The 1976 and 1984 Gazli, USSR, Earthquakes, Were They Induced? // Bull. Seismological Soc. V.75. 1985. № 5. Am. 1465-1468.